中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）41(2)：201～215（1992）

稻穀平衡相對濕度物性影響因子之研究[1]

陳 加 忠　　曹 之 祖[2]

摘要：此研究中量測在五個溫度範圍下兩品種稻穀，糙米與白米之平衡相對濕度之物性。三種穀物產品之適稱 ERH 模式參數值均列舉於此研究中。研究結果顯示稻穀具有遲滯性質，但其數值皆低於1.0%。樣本乾燥處理溫度的影響則十分顯著。研究結果與文獻資料比較可知測定方法，測定方法，測定人員技術與測定品種對稻穀，糙米與白米 ERH 物性並無顯著之影響，由此證實建立汎用穀物 ERH 模式的可行性。

關鍵詞：稻穀，糙米，白米，平衡相對濕度

農產品平衡含水率與平衡相對濕度之物性關係在加工作業之乾燥，儲存，通風等設計研究上爲必備之資料。近年來，以平衡相對濕度與儲存溫度兩項變數可建立預測種子儲存活力的汎用公式[5]。由於平衡相對濕度量測技術的開發，使得研究人員得以於短時間內量測大量且準確的數據。利用此種方法已完成國內數種農產品的物性量測[3,4]。

許多因子影響平衡相對濕度的物性，Neuber 氏[14]曾列舉各種可能影響的原因，並建議必須有一種能於短時間量測大量數據的方法，用以比較各因素對此物性之影響。新開發的「平衡相對濕度依序量測法」提供了此種機會[7]。

稻穀爲一種複合成份的農產品。其加工產品包括糙米（Brown rice）與白米（White rice），完整的平衡相對濕度物性研究應該包括此三種稻穀產品之量測，其溫度範圍應涵括加工作業之溫度，而其加工歷程之影響（去濕性與加濕性）亦需加以考慮。在國外的相關研究中，大多數資料僅爲在定溫環境下量測少數的數據[6,8,9,11,13,16,17]。已有包括數個溫度下量測之數據並未能合乎完整性之要求，亦未曾探討研究各影響因子對於此物性之影響[12,15,18]。國內在此方面的研究曾有張氏[1]在三溫度下的吸濕與去濕數據。陳氏等人[3]曾對於在熱風乾燥（50～55°C）所處理之穀物量測其5～45°C範圍下之吸濕與去濕數據，並建立評估適用之模式。由於稻穀爲爲本省主要生產的農作物，完整的相對濕度平衡含水率與溫度的關係物性與各影響因子對此物性之影響實有建立的必要。

此研究之目的如下：

1. 量測稻穀，糙米與白米在五種溫度下其含水率與平衡相對濕度之關係。
2. 量測比較上述作業中吸濕（Desorption）與去濕（Adsorption）之物性。
3. 量測比較品種，乾燥溫度對稻穀 ERH 物性之影響。
4. 比較量測數據與前人研究之資料。
5. 評估適用之平衡相對濕度模式和其參數。

---

1. 臺灣省農業試驗所研究報告第 1622 號。
2. 本所農工系副研究員，技士。

材料與方法

一、實驗材料

所用材料包括兩種稻穀品種和加工後之糙米，白米。

㈠稻　穀：

臺農67號品種去濕量測樣本在25°C環境下置於飽和鹽所形成之環境空間使其失去水份，再進行量測。加濕物性測定所用之樣本在25°C環境下與乾燥劑同置於密閉容器內，待其水份降至極低後，再加以調整至預定之含水率。另一測定品種爲秈稻臺農2號，其去濕物性量測樣本係利用50°C熱風乾燥至預定含水率。加濕物性量測樣本則以50°C熱風乾燥至極低水份含量後再加水調製至預設含水率。

㈡糙米與白米：

此兩種稻穀產品均在稻穀於16%（d.b.）含水率時加工而成，其碾製處理係於民間碾米廠加以執行，其樣本以50°C熱風調製至低含水率，高含水率區樣本則加水調製。糙米之最初含水率爲17.7%，白米之最初含水率爲18%。完成含水率調製之樣本均存放於250ml 之塑膠瓶內加以密封儲存一個月以上使其含水率達到平衡，高含水率之樣本於存於3°C之冷藏環境以避免發霉。

二、相對濕度感測器

此研究所用的相對濕度感測器有兩種：Vaisala HMD 30 US 與Rotronic Ｉ－100型，感測器均建立校正方程式[3]。

三、平衡相對濕度之量測

此研究採用方法介紹如下：

將已知固定含水率之標本置於樣本容器內，濕度感應元件置於樣本之間，元件之外有保護蓋以避免與穀粒接觸而損傷。整個容器形成一密閉系統。系統在達到平衡狀態時，農產品間隙內之空氣與穀物達到溫、濕度平衡，由感應元件所量測之空氣溫濕度即代表穀物之溫度與平衡相對濕度，樣本容器置於恆溫控制箱內，在到達第一設定溫度平衡時，量測記錄此溫濕度讀出值，然後調整恆溫室至下一階段溫度。在第二階段設定溫度下達到平衡之後，記錄溫濕度而再調整至第三階段設定溫度。經由此依序調整和量測方式，可在短時間內量測大量之平衡相對濕度數據，所得讀出 ERH 值再由已建立之校正方程式轉換爲眞實值。此研究量測溫度有五種（5，15，25，35，50°C），相對濕度之量測範圍爲10～95%。

四、平衡相對濕度模式

此研究中探討四個　ERH 模式對各種產品平衡相對濕度數據之適稱性，模式描述如下：RH 爲相對濕度（小數點），M 爲含水率（%，乾基），T 表示溫度（°C），A，B，與 C 爲常數

㈠修正 Henderson 式

$$RH=1-\mathrm{Exp}\,(-A\,(T+C)M^{b})$$

㈡Chung－Pfost 式

$$RH=\mathrm{Exp}\,\left(\frac{-A}{T+C}\mathrm{Exp}(-BM)\right)$$

㈢修正 Oswin 式

$$RH=\frac{1}{\left(\frac{A+BT}{M}\right)^{c}+1}$$

㈣修正 Halsey 式

$$RH=\mathrm{Exp}\,(\mathrm{Exp}\,(A+BT).M^{-c})$$

五、模式適稱性評估

以非線性迴歸技術評估四模式對各組數據之適稱性，其評估定量標準為標準差 S. E., P, 與 RMS 值，定性標準為殘差分佈圖。各標準之定義和計算公式如下。

$$P=\frac{100}{N}\Sigma\left|\frac{y-y}{y}\right|$$

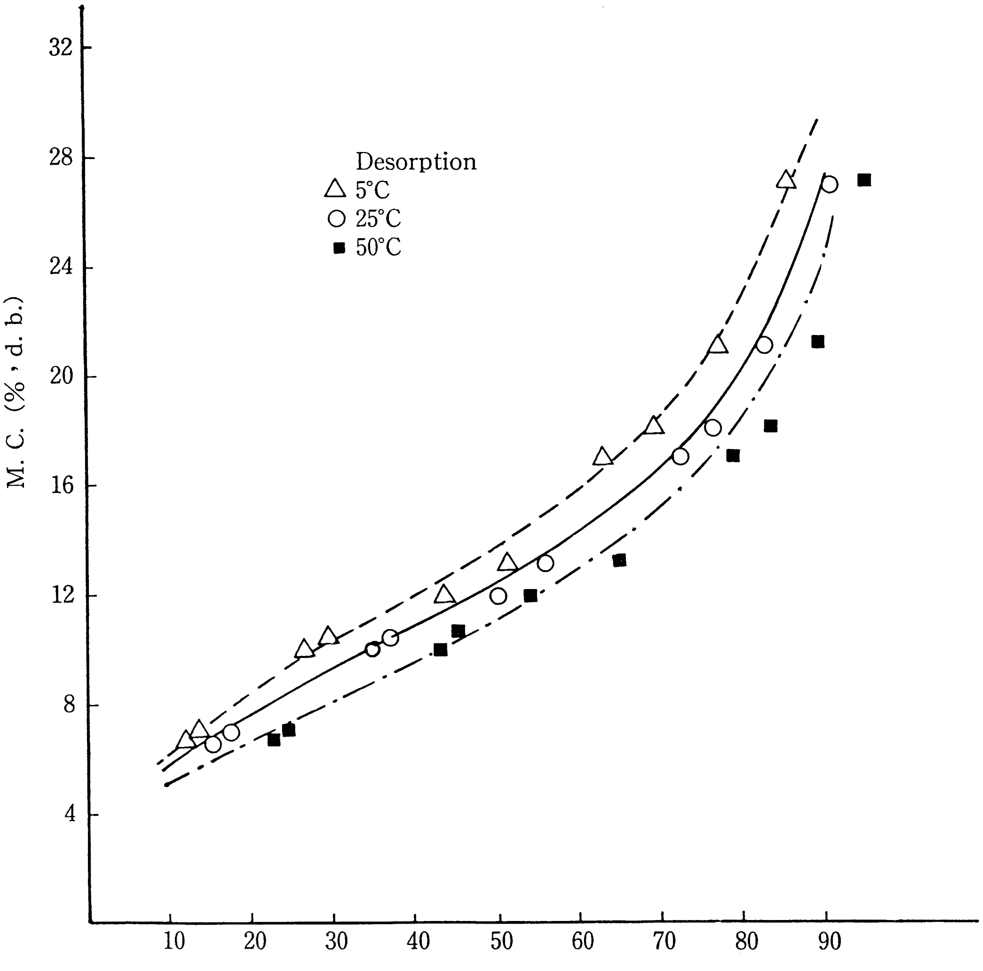
$$RMS=\left[\frac{1}{N}\Sigma\left(\frac{y-\hat{y}^2}{y}\right)\right]^{0.5}\times 100$$

N 為數據數目，y 為量測值，$\hat{y}$ 為模式預測值

結果與討論

一、稻穀 ERH/EMC

稻穀臺農67號以25°C乾燥處理之去濕數據如圖一所示。在固定溫度下，農產品之平衡含水率與相對濕度之關係曲線稱為等溫水份線。等溫水份線受溫度的影響主要在 RH 中間範圍。



圖一 稻穀之25°C乾燥去濕數據

Fig 1. Desorption data of rough rough rice dried at 25°C

四種 ERH 模式對於去濕與吸濕數據之適稱性比較結果與各參數值列於表一。由殘差圖分析可知修正 Halsey 式不適用稻穀之 ERH 物性數據。在適用的三個 ERH 模式中，其定量標準並不一致。去濕數據以修正 Herderson 式最佳，吸濕數據則無法有一致之結果，修正 Oswin 式之 R^2 最高，S. E. 值最低，但其 P 與 RMS 值則高於 Chung-Pfost 式之結果。以修正 Herderson 公式迴歸模式之預測曲線與量測數據之分佈比較如圖一，曲線分佈與數據有良好符合性。

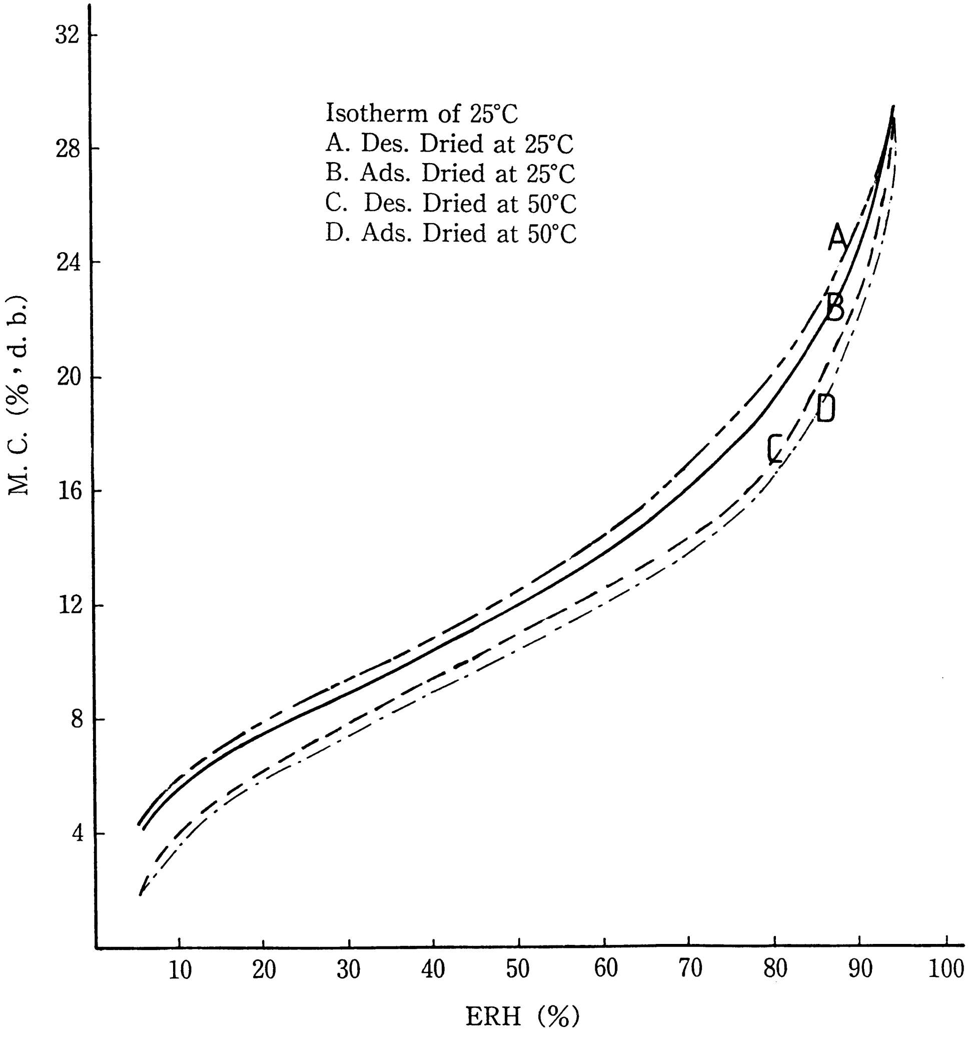
表一　稻穀臺農67號吸濕與去濕數據四 ERH 模式之估計參數和比較標準

Tale 1. Estimated parameters and comparison criteria for four ERH models of sorption data for rough rice (Tainun 67 dried at 25°C)

	Modified -Henderson	Chung -Pfost	Modified -Oswin	Modified -Halsey
Desorption				
A	6.2576×10^{-5}	431.78	14.086	4.84
B	1.9467	0.1678	-6.795×10^{-2}	1.2358×10^{-2}
C	57.038	54.07	2.9219	1.9868
R^2	0.994	0.992	0.9913	0.975
SE	2.04	2.34	2.48	4.23
P	3.93	4.23	5.28	10.0
RMS	5.80	6.57	7.86	14.05
Plot	U. S.	U. S.	U. S.(1)	Pattern(2)
Adsorption				
A	8.7663×10^{-5}	445.17	13.117	4.443
B	1.8125	0.1575	−0.677	-1.0886×10^{-2}
C	61.43	71.386	2.6074	1.8611
R^2	0.981	0.987	0.989	0.981
SE	3.45	3.09	2.67	3.08
P	6.08	4.58	5.72	6.68
RMS	8.38	6.18	2.03	9.58
Plot	U. S.	U. S.	U. S.	Pattern

1. U. S：Uniformly scattered point in the residual plot.
2. Pattern：A systematic pattern in the residual plot.

利用50°C乾燥處理之樣本其 ERH 物性已完成量測[4]，兩種不同處理溫度（25，50°C）在常溫（25°C）環境下其吸濕與去濕之等溫水份線比較如圖二所示。兩種處理溫度下之等溫水份線都有遲滯效應存在，但其數值不高，在同一相對濕度下，加工歷程對平衡含水率之影響約爲0.5～1.0%左右。在已有之文獻資料中，僅有 Putranon 等人[15]對於澳洲長稻與短稻曾進行詳細之遲滯物性研究，而其結果顯示兩種形狀，品種相異之稻穀，在同一相對濕度情況下其平衡含水率遲滯性質最大差異皆小於1.0%，此差異數值與此研究所得結果十分相近。



圖二 乾燥溫度對稻穀等溫水份線之影響

Fig 2. The effect of the dried temperatures on the isotherms of rough rice.

由圖二可知，以50°C處理之稻穀，其等溫水份線低於以25°C溫度處理之稻穀。此現象顯示在同一相對濕度下，稻穀乾燥溫度愈高，其持水性愈低，在量化數值方面，其差異值約爲2.5%～3.0%，在60～80%RH範圍時差異最大。由此可知遲滯因素對於等溫水份線之影響低於乾燥溫度。

在稻穀加工倉儲作業中，以 RH 65%時對應之平衡含水率爲安全儲存含水率[2]以自然乾燥之稻穀，其65% RH 對應之含水率約爲13%（濕基），而以乾燥機乾燥之穀粒，65% RH之相應含水率爲11.7%（濕基）。由此可知在決定稻穀長期儲存安全含水率之標準時，可由等溫水份線以瞭解乾燥溫度的影響。

秈稻臺農2號以50°C處理樣本的去濕與加濕數據，其四 ERH 模式適稱性之比較如表二所示。以適稱模式繪製成等溫水份線與臺農67號之結果互加比較，結果顯示兩品種的等溫水份線在60% RH範圍下近乎重合，即表示無差異值存在，在60% RH 以上，同一相對濕度環境則秈稻臺農2號有較高之平衡含水率，但差異值均在1.0%以內。

表二 秈稻臺農2號吸濕與去濕數據四 ERH 模式之估計參數和比較標準

Tale 2. Estimated parameters and comparison criteria for ERH models of sorption data for rough rice (Tainun Sun NO.2 dried at 50°C)

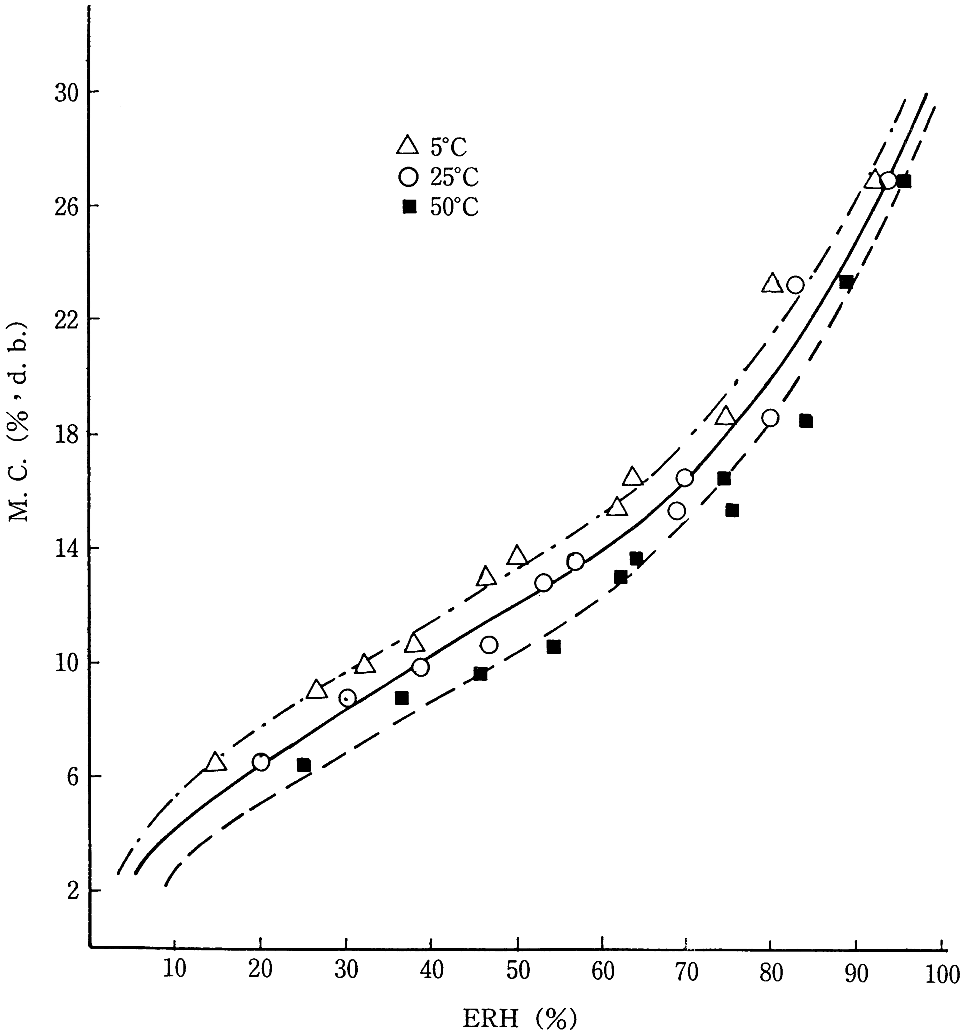
	Modified -Henderson	Chung -Pfost	Modified -Oswin	Modified -Halsey
Desorption				
A	1.1891×10^{-5}	518.53	11.86	4.49
B	1.7030	0.1704	-4.666×10^{-2}	8.72×10^{-2}
C	77.884	96.493	2.470	2.006
R^2	0.9805	0.984	0.990	0.993
SE	3.768	3.423	2.710	2.280
P	5.810	4.960	3.820	3.870
RMS	8.00	6.69	4.840	6.520
Plot	Pattern	U. S.	U. S.	Pattern
Adsorption				
A	1.2434×10^{-2}	462.83	12.3608	4.403
B	1.674	0.1586	-5.40725×10^{-2}	-1.018×10^{-2}
C	69.24	85.85	2.3704	1.911
R^2	0.982	0.982	0.992	0.976
SE	3.761	3.753	2.527	4.272
P	11.86	10.27	10.12	20.43
RMS	18.40	15.84	19.76	34.06
Plot	U. S.	U. S.	U. S.	Pattern

二、糙米與白米 ERH 物性

白米在三個溫度下其 ERH/EMC 關係如圖三所示，其等溫水份線呈現S 型曲線，溫度對曲線分佈之影響主要在於40～70% RH 範圍。糙米之等溫水份線分佈性質與白米十分類似。

在此研究中，白米與糙米於25°C時最初平衡相對濕度約爲70%，量測之樣本部份加水因此爲吸濕曲線，部份乾燥因此爲去濕曲線，由於樣本原先以穀粒材料由50°C熱風在乾燥機進行乾燥後，再進行碾米與精白，可謂加工作業全程皆受到熱風溫度所影響，由於在熱風乾燥後之穀粒其遲滯性質並不顯著[3]，此研究對糙米與白米所量測的 ERH 物性雖然包括吸濕與去濕歷程，在實用性上並無差異。

四個 ERH 模式對糙米與白米 ERH/EMC 五溫度下之數據的適稱性能比較與參數合計值如表三所示。如同稻穀之比較結果，修正 Halsey 式不適用此種農產品。對糙米而言，適用的三模式中其量化標準無最佳模式。對白米而言，Chung-Pfost 式爲最佳模式，其預測曲線如圖三示。



圖三 白米之去濕數據

Fig 3. Desorption data of white rice

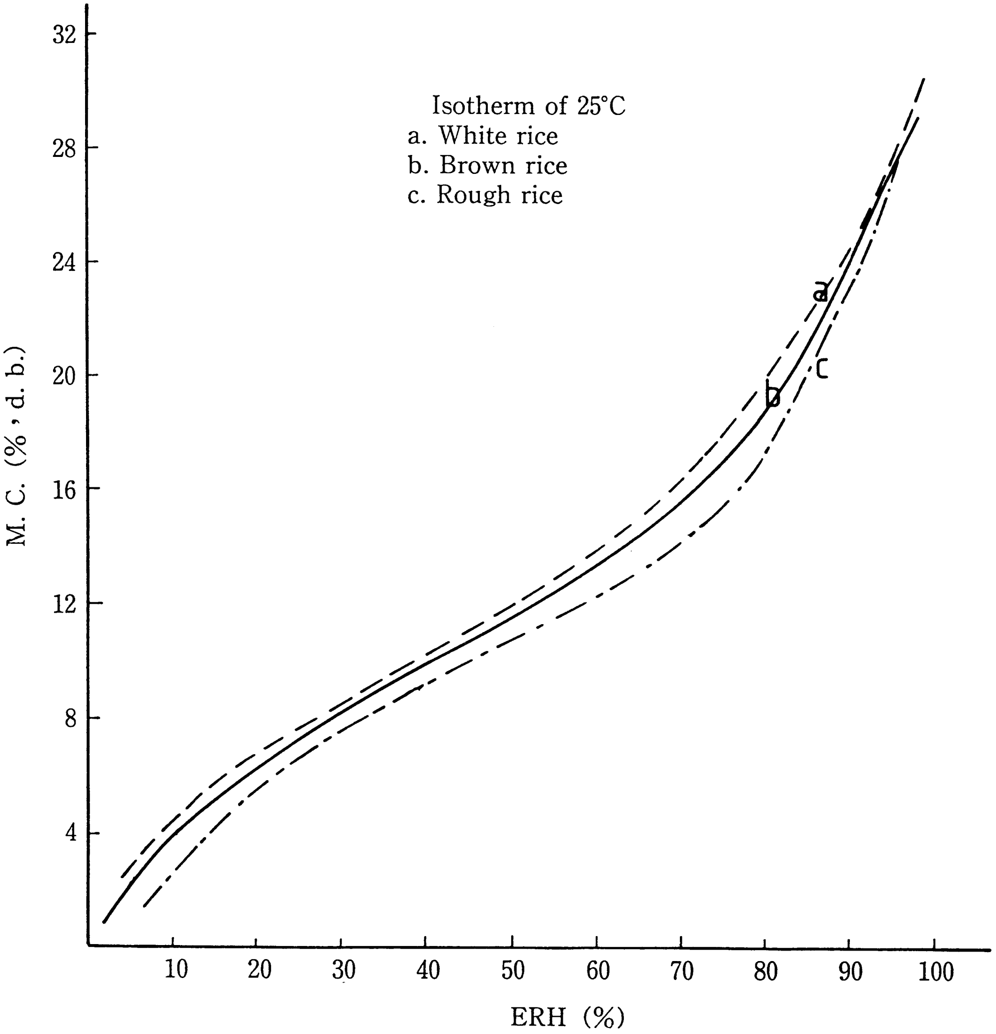
表三 稻穀臺農67號吸濕與去濕數據四 ERH 模式之估計參數和比較標準

Tale 1. Estimated parameters and comparison criteria for four ERH models of sorption data for brown rice and white rice (Tainun 67 dried at 25°C)

	Modified -Henderson	Chung -Pfost	Modified -Oswin	Modified -Halsey
糙 米				
A	3.7475×10^{-5}	546.265	12.8924	4.485
B	2.0470	0.1729	-4.866×10^{-2}	-8.627×10^{-2}
C	87.080	74.481	2.8841	1.898
R^2	0.9897	0.9908	0.989	0.9712
SE	2.5270	2.391	2.64	4.22
P	5.1570	6.073	6.54	12.735
RMS	8.50	9.63	9.97	18.60
Plot	U. S.	U. S.	U. S.	Pattern

白 米				
A	8.5224×10^{-5}	431.63	13.733	4.847
B	1.7560	0.1501	−0.677	−1.0205×10^{-2}
C	79.1167	76.269	2.6528	2.022
R^2	0.9833	0.9856	0.9892	0.992
SE	3.149	2.92	3.26	7.48
P	4.683	4.29	5.05	12.26
RMS	5.640	5.45	6.80	14.05
Plot	U. S.	U. S.	U. S.	Pattern

以相同樣本處理溫度（50°C）之三種稻穀產品其等溫水份線的比較如圖四。在相同的平衡相對濕度條件下，白米的吸水性最強，糙米次之，而稻穀最小。此現象可由其組成成份加以說明，糙米之含油量高於白米，而油質成份之吸水性幾乎不存在，因此持水力低於白米。稻穀含有稻殼，稻殼其主要組成成份纖維質降低了吸水性能。



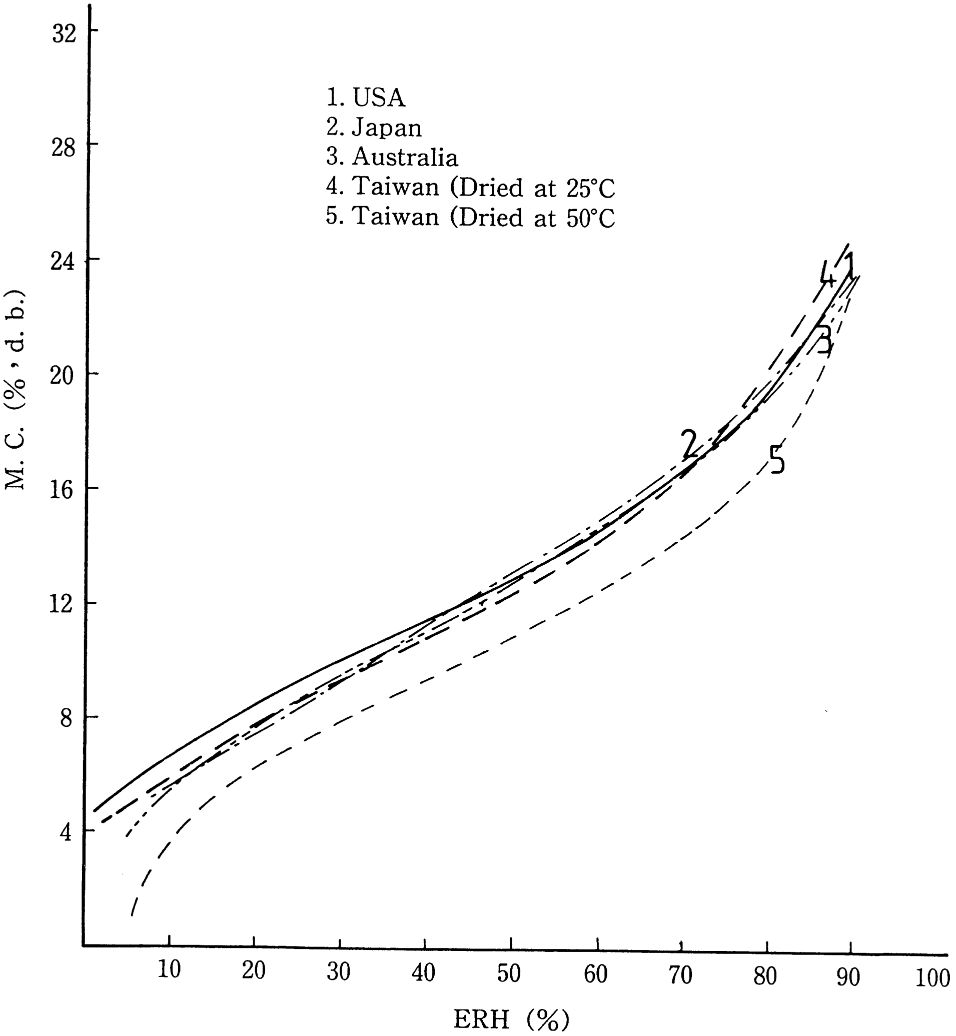
圖四 三種稻穀產品稻穀等溫水份線之比較

Fig 4. Comparison of the sorption isotherms three products of rice

三、與已知之文獻數據之比較

(一)稻　穀

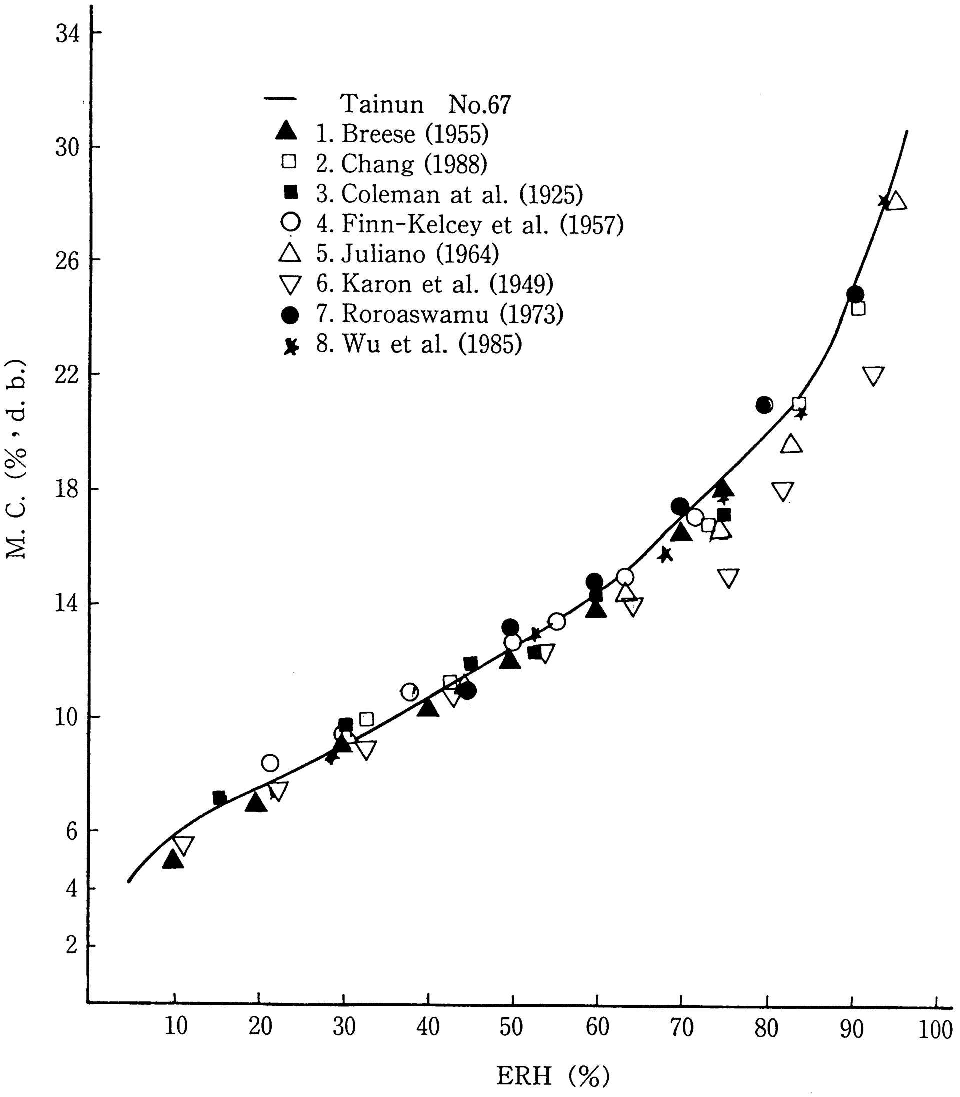
由文獻中顯示具有數種溫度下量測 ERH/EMC 之三組數據之資料爲美國[18]，日本[13]，與澳大利亞[15]。其中澳大利亞之數據包含長粒與短粒兩品種，兩品種之相異性並不顯著。此三組數據之最適模式已完成評估[7]，三組數據於25°C之去濕等濕水份線與臺農67號於兩乾燥溫度（25，50°C）處理後樣本之等溫水份線之比較結果圖示於圖五a。由此比較結果可知，本省主要品種臺農67號之等溫水份線與其他三個國家之研究結果十分相近，四組等溫水份線之含水率分佈差異均在0.8%（d.b.）之內，而以50°C乾燥之稻穀之其等溫水份線與其他四分佈曲線之含水率差異性約2.5～3.0%。由文獻得知，美國與日本稻穀 ERH/EMC 性質測定係利用傳統 EMC 方法，澳洲兩品種測定係利用 ERH 量測法。此由圖五a可知品種與測定方法對稻穀之 ERH 性質並無顯著差異，然而樣本乾燥處理溫度的影響極爲顯著。



圖五a. 數種不同稻穀25°C等溫水份線之比較

Fig 5a. Comparison of desorption isotherms of rough rice with previously published data.

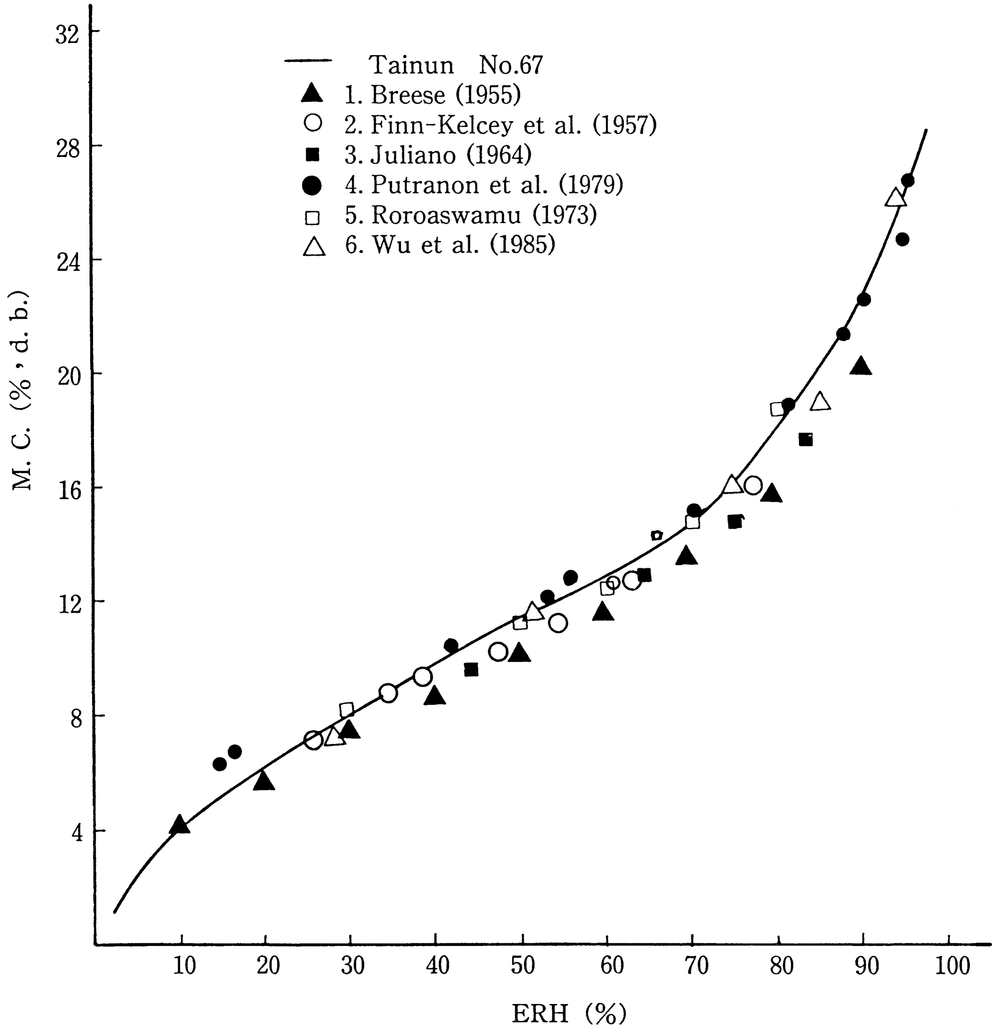
在已知文獻中有許多數據僅爲常溫（25°C）狀態下量測之少數數據，將八篇文獻所得之去濕數據與此研究中所得等溫水份線繪製比較如圖五b所示。圖中數據之分佈都十分近似此研究所得之等溫水份線，僅在 Karon[10]的數據中發現在70% RH 以上之三數據點有較大之偏離現象。



圖五b. 數種不同稻穀25°C去濕數據比較

Fig 5b. Comparison of desorption data of rough rice with previously published data.

將文獻所得6組吸濕數據（25°C）與此研究所得的吸濕等溫水份線比較，其結果描述於圖五c。六組數據的分佈都十分近似臺農67號等溫水份線。



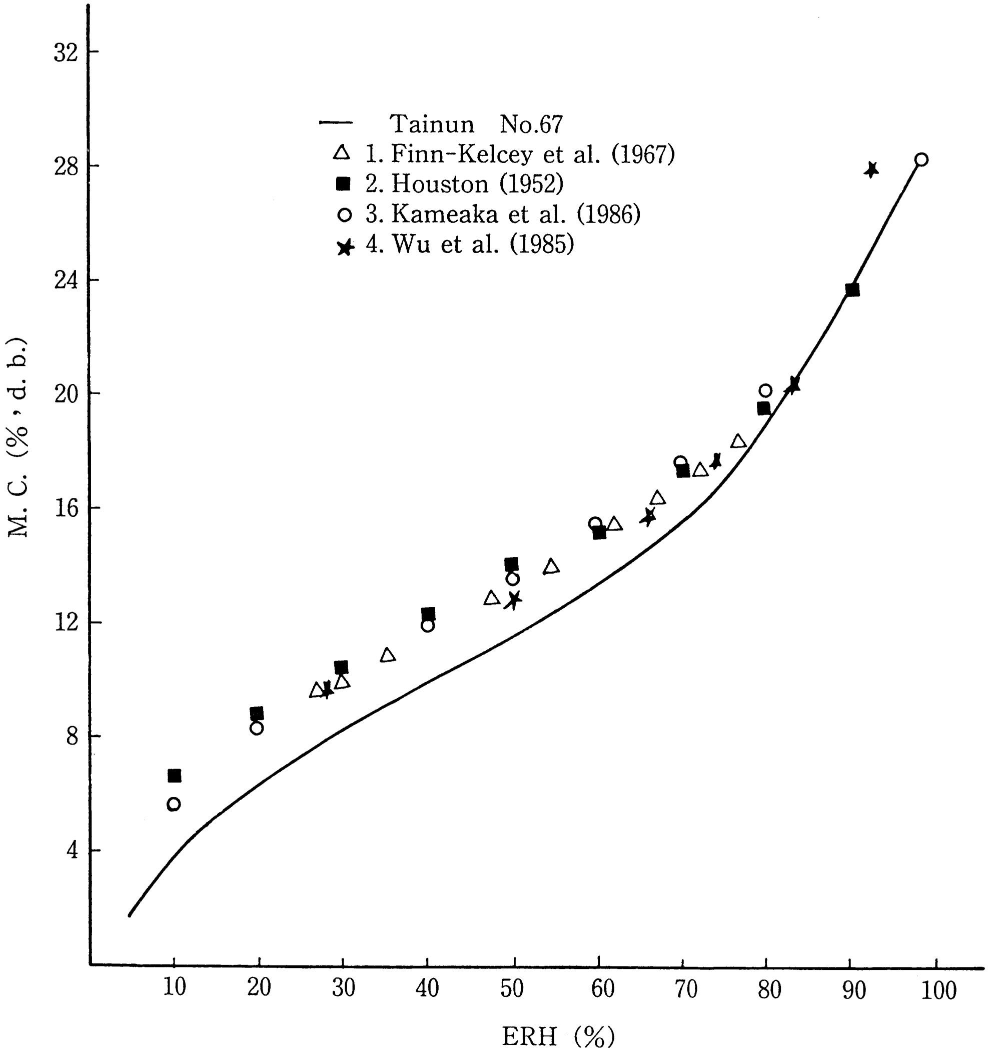
圖五c. 數種不同稻穀25°C吸濕數據比較

Fig 5c. Comparison of adsorption data of rough rice with previously published data.

由上述結果可知，由不同研究者以各種方法對不同品種量測之 ERH/EMC 物性其分佈均十分類似，此結果對於建立汎用的稻穀 ERH/EMC 模式有十分積極的意義。

(二)糙米

自文獻收集所得四組糙米於25°C之去濕數據與此研究中以50°C熱風處理之樣本比較其25°C之等溫水份線，此結果描述如圖六。如同稻穀，四組數據之分佈幾乎無差異性，而以此研究之等溫水份線之差異性在80% RH 以下之範圍則十分顯著，高 RH 範圍（80%以上）則近乎重合，可知不同的研究者，以不同方法，不同品種對糙米之 ERH/EMC 量測性質並無顯著差別，乾燥熱風處理則造成顯著差異。



圖六　數種不同糙米25°C去濕數據比較

Fig 6. Comparison of desorption data of brown rice with previously published data.

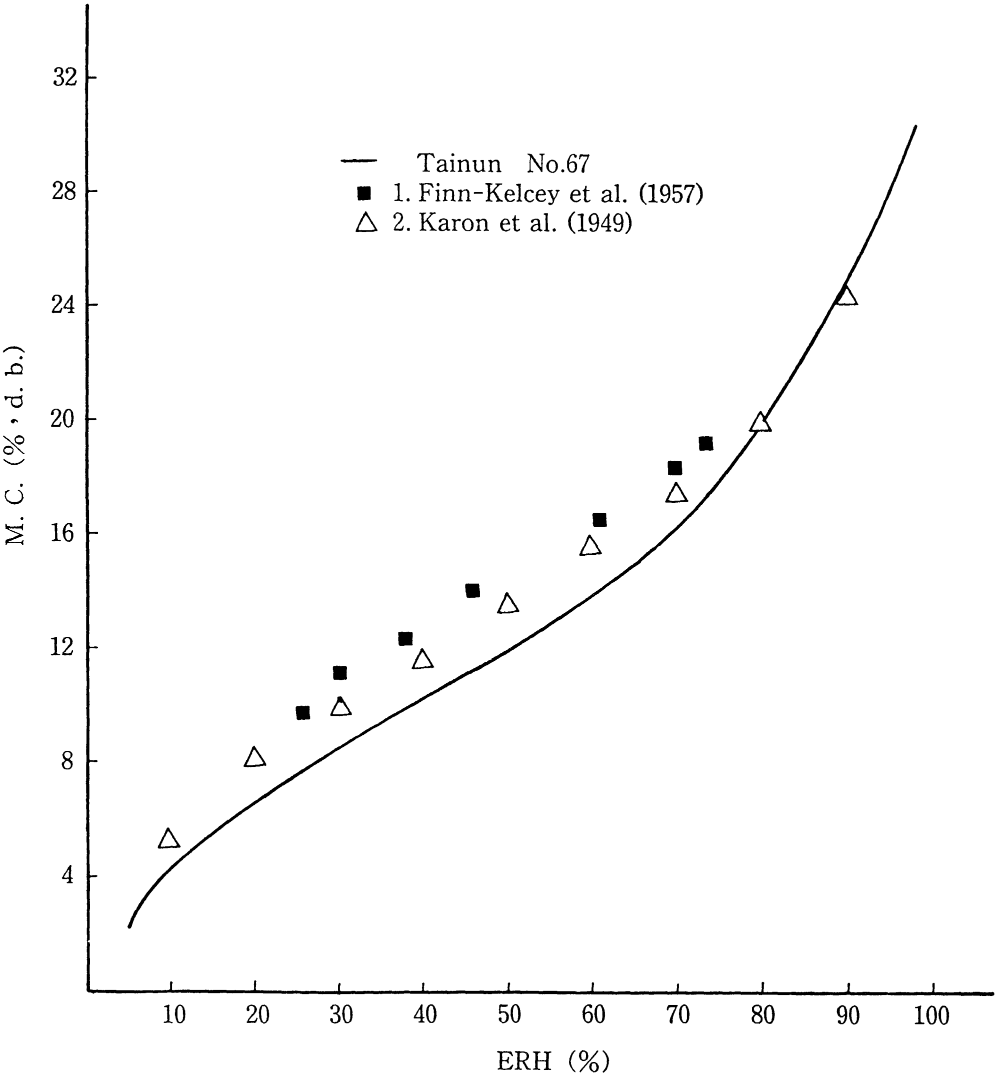
表三之適稱模式與其參數適用於利用乾燥機乾燥加工之穀粒，對以常溫乾燥再加工之糙米，其適用模式可利用 Kameoka 等人[13]之數據，其適用模式與參數值如下[7]：

1. 修正 Henderson 式

$A=3.23\times10^{-5}$，$B=2.2482$，$C=34.267$

㈢白米

有關白米之 EMC 量測數據較少，自文獻所得數據與此次研究所得之等溫水份線比較結果如圖七。如同糙米，在80%RH 以上範圍兩組數據十分接近，在80%以下，乾燥溫度則明顯地減低了白米的持水性。兩組文獻所得數據之差異並不大。因此白米 ERH 物性之主要影響因子，主要以處理乾燥溫度爲主。



圖七 數種不同白米25°C去濕數據比較

Fig 7. Comparison of desorption data of white rice with previously published data.

結 論

綜合以上研究結果所得之結論如下：

1. 稻穀，糙米與白米之平衡相對濕度，平衡含水率與溫度三者數據之關係適稱模式爲修正 Henderson 式，Chung-Pfost 與修正 Oswin 式，各模式之參數值列於本文各表。

2. 稻穀具有遲滯現象，其數值之差異值並不大。在同一相對濕度情況下，去濕與吸濕含水率的差值於1.0%之內。穀物乾燥處理對 ERH/EMC 之物性分佈則有顯著的差異，在執行加工作業時，必須考慮此處理溫度之影響。

3. 本省稻穀品種中臺農秈稻2號其等溫水份線與臺農67號品種之等溫水份線在60% RH 範圍內以下近乎相同，在60% RH 以上，同一相對濕度情況下，兩品種 EMC 值差異在1.0%以內。

4. 由文獻資料之比較結果，測定方式，測定品種和不同測定人員之技術，對於稻穀，糙米，白

米三種穀物產品的 ERH/EMC 關係物性並無顯著之影響，因此證實了建立世界穀物汎用 ERH模式的可行性。

參考文獻

1. 張森富，1988，Henderson 平衡含水率模式之修正及本省主要水稻與玉米之平衡含水率曲線，農業工程學報，34(1)：16—39。
2. 陳加忠，1990，穀物平衡相對濕度性質在農產品儲存上之應用，省農試所技術服務季刊，1(1)：4—7。
3. 陳加忠，賴建洲，曹之祖.1990.稻穀平衡相對濕度性能之研究，中華農業研究，39(4)：247—366。
4. 陳加忠，曹之祖，賴建洲.1991.落花生平衡相對濕度物性之研究，中華農業研究，40(2)：145—160。
5. 陳加忠，吳瑞香.1991.種子平衡相對濕度與溫度對儲藏壽命影響之研究，農業工程學報，37(3)：89—101。
6. Breese, M. H, 1955. Hystersis in the hygroscopoc equilibrium of rough rice at 25°C. Cereal Chemistry, 32(6)：481—487.
7. Chen. C. 1988. A study of equilibrium relative humidity for yellow-dent corn kernels. Ph. D. Thesis. University of Minnesota, St. Paul MN.
8. Coleman, D. A. and H. C. Fellows. 1925. Hygroscopic moisture of cereal grains and flaxseed exposed to atmospheres of different relative humidities. Cereal Chemistry, 12：275—287.
9. Finn-Kelcey, P and D. G. Hulbert. 1957. The relationship between relative humidity and the moisture content of agricultural products-Preliminary Report. Technological Report of British Electrical Research Association, W/T330.
10. Houston, D. F. 1952. Hygroscopic equilibrium of brown rice. Cereal Chemistry, 29(1)：71—75.
11. Juliao, J. O. 1964. Hygroscopic equilibria of rice. Cereal Chemistry 41(3)：191—197.
12. Kameoka, T, D. Jayas, H. Morishima, and S. Sokhansa. 1986. Equilibrium moisture content of rice. In：Food engineering and process applications. Vol：I. Transport Phenomena, pp：201—210, Elsevier Applied Science Publisheres, London.
13. Karon, M. L. and M. E. Adams, 1949. Hygroscopic equilibrium of rice and rice fractions. Cereal Chemistry, 26(1)：1—12.
14. Neuber, E. E. 1980. Critical considerations of moisture sorption isotherms for cereals. ASAE paper 80—3015. ASAE. St. Joseph, MI.
15. Putranon, R., R. E. Bowrey, and J. Eccleston, 1979, Sorption isotherms for two cultivars of paddy rice grown in Australia. Food technology in Australia, Dec：510—515.
16. Roroaswamu, J, R. 1973. Observations on the sorption of water vapour by rice and sorghum. J. of Food Science and Technology, India, 10(2)：59—61.
17. Wu, J, T. Kimura and H. Shimizu. 1985, Equilibrium moisture content in rough rice under a low-temperature and high humidity condition, J. of the Society of Agricultural Structural Structures, Japan, 17(1)：73—79.
18. Zuritz, C., R. P. Sign, S. M. Moin and S. M. Henderson, 1979. Desorption isotherms of rough rice from 10 to 40°C, Trans of ASAE, 22(2)：433—440.

Studies of Effect Factors on Equilibrium Relative Humidity of Rice Products[1]

C. C. Chen and C. T. Tsao[2]

SUMMARY

The equilibrium relative humidity of rough rice, brown rice and white rice were measured at temperatures ranging from 5 to 50°C. The adequate ERH model and its estimated parameters were showed in this study. Hysteresis effect could be found for the ERH properties of rough rice, however, the differences of moisture content between desorption and adsorption were within 1.0%. The treatment temperatures of the sample had the significant effect. Comparing the results of this research with the previously published data, the effect of the determinating method, techniques and grain varieties did not affected the ERH properties. It is availables to estiablish the universal ERH model of rough rice and its products.

Key words : Rough rice, Brown rice, White rice, Equilibrium relative humidity

---

1. Contribution No. 1622 from Taiwan Agricultural Rsearch Institute,
2. Associate Researcher, Junior Speciallist, TARI, Taichung, Taiwan.